

ЗАПРЕДЕЛЬНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ ВБЛИЗИ ОТКРЫТЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Абдылдаев Э.К., Абдылдаев А.Е., Чунуев И.К., Исаев Б.А., Нурдинова А.А.

ИГД и ГТ, Бишкек, Кыргызстан, Ichunuev@gmail.com

Аннотация: Рассматривается запредельное деформирование и разрушение породных массивов вблизи открытых и подземных горных выработок для двух контактных задач взаимодействия крепи сводчатого сечения с неоднородным массивом и крепи сложного очертания в однородном массиве.

Ключевые слова: коэффициента тектоники, подземные выработки, карьерные откосы, сечение.

POST-LIMIT DEFORMATION AND FAILURE OF ROCK MASSES NEAR THE SURFACE AND UNDERGROUND MINE WORKINGS

Abdyldaev E.K., Abdyldaev A.E., Chunuev I.K., Isaev B.A., Nurdinova A.A.

Institute of mining and mining technologies named after, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract: This paper examines post-limit deformation and failure of rock masses near the surface and underground mine for two contact problems-interaction lining the vaulted section with heterogeneous array and supports complex shapes in a uniform array.

Key words: tectonics coefficient, underground workings, quarry slopes, cross-section.

При запредельном деформировании породного массива вблизи подземных выработок образуются зоны полного разрушения, разупрочнения и предельного состояния. Эти зоны могут охватить часть или весь контур выработки в зависимости от граничных условий, профиля контура, а также свойств горных пород. В работе проведена серия решений для горизонтальной протяженной горной выработки кругового поперечного сечения, находящейся в поле равнокомпонентных и неравнокомпонентных напряжений.

В результате численных расчетов установлены формы и размеры зон неупругих деформаций, напряженное состояние породного массива и величина конвергенции контура выработки. Анализ результатов показал существенную зависимость размеров зоны неупругих деформаций от свойств горных пород. Установлено, что по модели разупрочняющейся и разрыхляющейся среды размеры зон неупругих деформаций намного больше, чем по моделям I, II, III (таблица 1). Кроме того, по модели III наблюдается снижение уровня вертикальных напряжений вблизи выработки и область концентраций напряжений отодвигается от контура выработки вглубь массива. В табл. I приведены средние величины конвергенции (расчетные и измеренные) в долях радиуса выработки. Сопоставление показывает близость полученных результатов и экспериментальных данных.

Таблица I

Конвергенция	Модель II			Модель III	Измеренные
	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 9$	$\lambda = 3$	
U_R	-0,102	-0,124	-0,161	- 0,150	-0,178

В практике проведения горных выработок в большинстве случаев применяются крепи некругового очертания. В связи с этим в работе с учетом запредельной деформируемости породного массива рассмотрены следующие контактные задачи: в первой задаче рассматривается случай взаимодействия крепи сводчатого сечения с неоднородным массивом, а во второй - взаимодействия крепи сложного очертания в однородном массиве. На различных глубинах расположения выработки исследовалось влияние механических свойств однородной среды, а также неоднородной среды со слабым и прочным слоем на напряженно-деформированное состояние крепи и породного массива. Установлены размеры зон неупругих деформаций и показано, что с увеличением глубины эти зоны растут.

Для различных условий напряженного состояния и свойств породного массива контактные нагрузки на крепь и напряжения в крепи отличаются как по характеру, так и по максимальным значениям. Нагрузка в зоне прочного слоя определяется в основном жесткостью крепи и механическими характеристиками окружающего массива. На контакте крепи со слабым слоем наблюдается увеличение нормальных нагрузок и уменьшение касательных напряжений. Анализ проведенных исследований позволил обосновать устойчивое сечение выработки, вид крепи и рекомендации по устойчивости горных выработок для шахты Джергалан.

Многочисленными натурными наблюдениями и исследованиями деформаций откосов на моделях установлено, что при бортовом массиве карьера до обрушения претерпевает сложную деформацию - горизонтальное растяжение, вертикальное сжатие и сдвиг. Нами в работе на основе разработанных моделей и численной процедуры исследовано напряженно - деформированное состояние откосов карьеров, сложенных однородными и неоднородными слоистыми, трещиноватыми породами, а также проанализирована несущая способность слабого массива, нагруженного горнотранспортным оборудованием.

Одним из важных вопросов, связанных с оценкой устойчивости откосов, был этап моделирования процесса деформирования откосов на эквивалентных материалах и на ЭВМ. Первоначально, моделированием откосов на эквивалентных материалах, установлены зоны неупругих деформаций, концентрации напряжений и величины предельных относительных деформаций (для горизонтального растяжения – 5×10^{-3} , для вертикального сжатия – $(40-50) \times 10^{-3}$, для сдвигов – $(80-100) \times 10^{-3}$) и абсолютных смещений на -1 мм. После установления картины деформирования модели откосов на эквивалентных материалах появилась возможность оценить результаты расчетов напряженно - деформированного состояния откосов выполненных на ЭВМ методом конечных элементов. Расчеты проведены по модели упругой среды, упругопластической разрыхляющейся среды и среды с упрочнением в инкрементальном варианте теории пластичности, с постепенным углублением откоса, начиная с первоначального нетронутого состояния массива. Картины распределения зоны неупругих деформаций и изолиний, построенные на основе метода конечных элементов на ЭВМ и моделирования на эквивалентных материалах подобны. При этом расчетные значения указанных выше величин составляют: максимальные смещения - 12 мм, горизонтальные относительные деформации – 25×10^{-3} , вертикальные – $(20-25) \times 10^{-3}$, сдвиги – 70×10^{-3} . Для оценки влияния слабого слоя на напряженно - деформированное состояние откосов и определения несущей способности слабого массива получено несколько решений. Анализ этих решений позволяет отметить, что в силу неоднородности массива распределение напряжений неравномерно, в слабых слоях уровень напряжений значительно ниже, чем в прочных слоях. Вблизи поверхности откоса в неоднородном массиве значения σ_x , σ_y , τ_{xy} уменьшаются по сравнению с однородным на 10-25%, а вдали от поверхности σ_x и τ_{xy} уменьшаются на 5-10%, при этом σ_y увеличиваются на 8-11%. Величина смещений и деформации в элементах неоднородного массива в несколько раз больше, чем в однородном. Переход элементов слабого слоя в пластическое состояние приводит к возникновению пластических шарниров, позволяющих опрокидываться прочным слоям в сторону выработанного пространства.

Анализ несущей способности массива и расчет величин смещений под нагрузкой выемочной техники проведен на примере перегона тяжелого экскаватора из монтажной площадки до глубины карьера. Массив представлен слабыми водонасыщенными суглинками с низкими показателями сопротивляемости сдвигу. Слой суглинков имел мощность до 20 м и подстилался прочными песчаниками. Для решения этой задачи выполнены расчеты методом конечных элементов по модели упруго - пластической среды и проведены испытания в лабораторных условиях на моделях из эквивалентных материалов. В ходе расчета также выяснен механизм работы двухслойного основания под действием приложенных нагрузок.

Удовлетворение возрастающей потребности народного хозяйства в цветных и благородных металлах, в особенности золота обеспечивается главным образом за счет преимущественного развития открытого способа разработки. Возрастающие объемы горных работ, выполняемых открытым способом, ухудшение инженерно-геологических условий и увеличение глубины карьеров требуют особого внимания к обеспечению

длительной устойчивости карьерных откосов, параметры которых в значительной мере определяют экономичность и безопасность отработки месторождений.

Разработка месторождения "Макмал", согласно проекту института "ВНИПИ горцветмет", производится открытым способом, горизонтальными слоями с транспортировкой пород вскрыши во внешние отвалы. За прошедшее время отработаны и поставлены в предельное положение горизонты 2770, 2755, 2740, 2725, 2710, 2695, 2680, 2665, 2650, 2635, 2615 м. В дальнейшем отработаны запасы открытым способом до горизонта 2500 м. За период отработки северный борт карьера в целом находился в устойчивом состоянии, лишь отмечались незначительные деформации верхних уступов (горизонт 2725, 2710 м) на участках выходов сильно нарушенных даек лампрофиров. Деформации произошли в виде локальных обрушений с последующим осыпанием кусков породной массы. Разработка месторождения Макмал производилась открытым способом, а в дальнейшем отработан подземным способом. В процессе эксплуатации карьера в массиве северного борта карьера геологической службой зафиксировано наличие поверхностей ослабления. Возник в свое время вопрос оценки устойчивости борта карьера при увеличении глубины открытой разработки до горизонта 2500 м. Геологическая структура массива в районе месторождения сложная: вмещающие породы представлены трещиноватыми интрузивными и метаморфическими породами, в северном борту преобладают мраморы и граниты. Потенциальная призма обрушения в верхней части сложена мраморами, переходящими в выветрелые граниты. Гранитами также сложена нижняя часть борта. В расчетной схеме зоны нарушения заполняются тектонической глиной трения, физико-механические характеристики принято согласно табл.2. Проанализированы по отдельности три варианта контура проектируемого карьера: I-ВАРИАНТ С ПРИЗМОЙ УПОРА; II-ВАРИАНТ ОПТИМАЛЬНЫЙ МКЭ; III-ВАРИАНТ С РАЗНОСОМ СЕВЕРНОГО БОРТА.

Таблица 2

Порода	Модуль Упругости-Е, МПа	Коэффициент Пуассона- ν	Объемный вес γ кН/м ³	Коэффициент сцепления -С, МПа	Угол внутреннего трения- φ , градус
Мрамор	$5.56 \cdot 10^4$	0.3	26.6	4.29	32
Известняк Мраморированный	$6.05 \cdot 10^4$	0.28	27.1	6.5	32
Гранит Крупнозернистый	$6.93 \cdot 10^4$	0.26	26	7.28	34
Поверхности ослабления	10^4	0.4	18.9	0.1	34

В результате исследований нами проведена ревизия ранее выданных рекомендаций с учетом более поздних результатов.

Задача решалась согласно выбранной расчетной схеме поэтапно с постепенным углублением карьера. Первоначально определяются поля напряжений для нетронутого состояния массива. Затем отрабатываются циклично горизонты 2620, 2560 и 2500.

Задача решалась при трех вариантах контура карьера по модели упруго - пластической среды с учетом трещиноватости и контактных условий, определяемых согласно выбранной расчетной схеме с постепенным (поэтапным) углублением карьера. Сначала определяются поля напряжений для нетронутого состояния массива, затем отрабатываются циклично горизонты 2620, 2560 и 2500 м, с вариацией граничных условий на одной сети конечных элементов, учитываемых в автоматическом режиме.

Анализ результатов позволяет отметить, что зона влияния откоса вглубь массива распространяется в пределах (0.74-1.43) Н (Н-глубина карьера). Зоны растягивающих напряжений возникают в прибортовой части массива на горизонте 2830 - 2920 м и на подошве откоса, где деформации незначительны. Изолиния ω соответствующая нулевым значением расположена в горизонтах 2610 - 2530 м. причем эта изолиния, начиная с верхнего горизонта вплоть до 2560 м, ориентирована вдоль поверхности ослабления и затем на горизонте 2530 м выходит на откос. Ширина охвата изолинии, в верхней части откоса,

составляет около 30 м, в средней части- 50 м, а в нижней-25 м. Количественное сравнение значений главных напряжений вблизи поверхности откоса, отработанного до окончательной глубины карьера с нетронутым состоянием массива, свидетельствует о том, что на горизонтах 2740, 2680, 2620 значение σ_1 увеличивается на 21%, 25%, 12% соответственно, а σ_3 уменьшается на 43, 23, 50% соответственно.

Результаты натурных исследований многих авторов по геомеханической оценке рудных месторождений горноскладчатых областей, в частности для Средней Азии и Казахстана, свидетельствуют о том, что горизонтальные компоненты напряжений по величине превосходят вертикальные. По нашей схеме эта компонента состоит из трех составляющих:

$$\sigma_x = \sigma_p + \sigma_o + \sigma_T \quad (11)$$

где σ_p компонента, обусловленная весом горных пород; σ_o - остаточное магматогенное и сохранившееся после запредельного деформирования напряжение; σ_T - напряжение возникающее под влиянием тектонических процессов. Такое представление компонентов σ_x применено при решении для трех вариантов контура карьера, а результаты расчета сопоставлены с данными полученными без учета тектонических напряжений. Анализом расчетных данных определено значение коэффициента запаса устойчивости (k) для всех вариантов и составлена функциональная зависимость Кот коэффициента тектоники (t):

$$K = 1.0876 e^{-0.0797 t} \quad (12)$$

Формула 12 выведена на основании расчета с использованием показательной функции $k=a \cdot e^{-bt}$, где постоянные a и b определены методом наименьших квадратов.

На основе расчетных данных получили результаты изменения коэффициента запаса устойчивости k в зависимости от t (таблица 3). Анализ таблицы показывает, что во всех вариантах изменение k по сравнению с вариантами без учета тектонических напряжений в процентном отношении составляют 7,13 и 21 при значениях $t=1,2$ и 3 соответственно.

Таблица 3

Номер вариантов	коэффициент устойчивости k				
	По формуле ВНИМИ	(МКЭ)	С учетом тектонических напряжений (МКЭ)		
	$t=0$	$t=0$	$t=1$	$t=2$	$T=3$
I-ВАРИАНТ С призмой упора	0.96	0.98	0.95	0.85	0.77
II-ВАРИАНТ Оптимальный МКЭ	1.01	1.09	1.01	0.95	0.86
III-ВАРИАНТ с разном северного борта	1.08	1.14	1.06	0.99	0.90

На основе проведенных исследований были разработаны и внедрены рекомендации по сохранению северного борта карьера Макмал в устойчивом состоянии.

Таким образом, ревизия ранее выданных рекомендаций с учетом результатов последних исследований и практического опыта фактической отработки Макмальского месторождения (отработан в настоящее время) показала, что ранее данные рекомендации в основном были правильные, а на данном этапе уточнены некоторые параметры, которые несомненно будут учтены при исследованиях на других месторождениях Кыргызстана.

Использованная литература

1. Абдылдаев Э.К. Оценка напряженно-деформированного состояния откосов и реализация расчетных моделей сред методом конечных элементов // Маркшейдерское дело в социалистических странах. – Л., 1988.
2. Абдылдаев Э.К. Анализ устойчивости северного борта карьера «Макмал». – Каракол, 1999.
3. Абдылдаев Э.К. Методика оценки устойчивости породного массива вблизи выработок. – Алматы, 2006.
4. Чунуев И.К., Айтматов И.Т. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов пород нагорных карьеров. – Б.: Илим, 1997.